

Б. М. ГОРКУНОВ, С. Г. ЛЬВОВ, Д. В. ГЛАДЧЕНКО, САЛИБА АБДЕЛЬ НУР

РАСПОЗНАВАНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПО ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Предложен вихретоковый метод распознавания структуры материалов ферромагнитных цилиндрических прутков по их электромагнитным характеристикам. Проведено одновременное бесконтактное определение относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости с применением проходного параметрического электромагнитного преобразователя включённого в схему моста переменного тока. Выполнен анализ чувствительности и оценка погрешностей, что позволяет рационально выбирать режимы работы преобразователя и измерительной аппаратуры. На основании экспериментальных данных была проведена разбраковка образцов по маркам стали.

Ключевые слова: параметрический электромагнитный преобразователь, относительная магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость

Б. М. ГОРКУНОВ, С. Г. ЛЬВОВ, Д. В. ГЛАДЧЕНКО, САЛИБА АБДЕЛЬ НУР

РОЗПІЗНАВАННЯ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ ЗА ЇХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Запропоновано вихрострумовий метод розпізнавання структури матеріалів феромагнітних циліндричних прутків по їх електромагнітним характеристикам. Проведено одночасне безконтактне визначення відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності із застосуванням проходного параметричного електромагнітного перетворювача включеного в схему моста змінного струму. Виконано аналіз чутливості і оцінка похибок, що дозволяє раціонально вибрати режими роботи перетворювача і вимірювальної апаратури. На підставі експериментальних даних було проведено розбраковування зразків за марками сталі.

Ключові слова: параметричний електромагнітний перетворювач, відносна магнітна проникність, питома електрична провідність

B. M. GORKUNOV, S. G. LVOV, D. V. HLADCHENKO, SALIBA ABDEL NOUR

RECOGNITION OF THE STRUCTURE OF MATERIALS OF CYLINDRICAL SAMPLES BY THEIR ELECTROMAGNETIC PARAMETERS

An eddy current method for recognizing the structure of materials of ferromagnetic cylindrical rods according to their electromagnetic characteristics is proposed. The inclusion of parametric converters in bridge circuits is more expedient from the point of view of achieving high sensitivity and measurement accuracy. To determine the sensitivity of the parametric electromagnetic converter, a preliminary calculation of the expected values was carried out. A sensitivity analysis and an error estimate were performed, which makes it possible to rationally choose the operating modes of the converter and measuring equipment. Based on the experimental data, the samples were graded by steel grades. The direct and inverse problem of studying an electromagnetic transducer to control the electromagnetic parameters of cylindrical samples made of different steel grades was solved. Different operating modes of the converter are determined by the sensitivity of the method for the generalized parameter x ($1.5 \leq x \leq 3$). The estimated errors of contactless control of magnetic and electrical parameters, which were 1.3 % and 2.6 %, respectively. The total errors of determining the relative magnetic permeability and specific electrical conductivity did not exceed the expected calculated values.

Keywords: parametric electromagnetic converter, relative magnetic permeability, specific electric conductivity

Введение. Распознавание материалов по маркам стали осуществляется по электромагнитным характеристикам материала.

Особый практический интерес представляют одновременные бесконтактные измерения магнитной проницаемости μ_r и удельной электрической проводимости σ цилиндрических проводящих изделий с помощью проходного параметрического электромагнитного преобразователя (ПЭМП) [1]. Для этих целей, как правило, применяются накладные преобразователи, которые дают возможность измерять σ изделия непосредственно в месте контакта преобразователя.

К основным достоинствам ПЭМП относятся:

- использование достаточно однородного магнитного поля внутри преобразователя;
- простота конструктивных решений, поскольку функции создания магнитного потока и измерения его характеристик выполняет всего лишь одна обмотка;
- возможность непосредственного включения их в схемы мостов переменного тока, на которых техника измерений достигла больших успехов, благодаря таким характеристикам как высокая точность, чувстви-

тельность, многопредельность;

– использование ПЭМП совместно с автоматическими цифровыми мостами переменного тока даёт возможность построения автоматизированных устройств на базе микро-ЭВМ для структурного анализа проводящих изделий, а также обработки выходных сигналов преобразователя при многопараметровых измерениях [2].

Целью работы является исследование электромагнитного преобразователя для контроля электромагнитных параметров цилиндрических образцов, определение рациональных по чувствительности режимов работы и оценка погрешности бесконтактного контроля магнитных и электрических параметров.

Основная часть. Рассмотрим работу проходного ПЭМП для одновременного бесконтактного измерения μ_r и σ сплошных цилиндрических проводящих изделий.

Для одновременного измерения двух параметров цилиндрического изделия с помощью ПЭМП необходимо измерять сразу два каких-либо электрических параметра преобразователя. Такими параметрами мо-

гут быть амплитуда и фаза намагничивающего тока при постоянном напряжении, или амплитуда и фаза напряжения при $I = \text{const}$, или эквивалентные активное сопротивление и индуктивность, или активное и реактивное вносимые сопротивления преобразователя [3].

Включение параметрических преобразователей в мостовые схемы более целесообразно с точки зрения достижения высокой чувствительности и точности измерения. Для определения чувствительности работы ПЭМП рассмотрим решение прямой задачи.

Исходя из заданного конкретного значения обобщённого параметра x и учитывая формулу [3]:

$$x = \frac{a}{2} \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; μ_0 – магнитная постоянная равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; a – радиус образца, находим частоту f изменения зондирующего магнитного поля:

$$f = \frac{x^2}{2\pi \mu_0 \mu_r \sigma a^2}. \quad (2)$$

Определим сопротивление R обмотки ПЭМП при отсутствии в нем образца:

$$R = \rho_{np} \frac{l_{np}}{S_{np}}, \quad (3)$$

где ρ_{np} – удельное электрическое сопротивление медного провода обмотки; l_{np} и S_{np} – длина и площадь поперечного сечения провода обмотки определяют по формулам: $l_{np} = 2\pi a_n W$, $S_{np} = \frac{\pi d_{np}^2}{4}$, $W = \frac{l_n K_3}{d_{np}}$; l_n – длина обмотки ПЭМП; a_n – радиус обмотки преобразователя, K_3 – коэффициент заполнения обмотки.

Определим индуктивность обмотки ПЭМП без образца:

$$L = \frac{W_1^2 \pi a_n^2 \mu_0}{l_n}. \quad (4)$$

Рассчитаем коэффициент заполнения $\eta = a^2/a_n^2$.

Учитывая результаты работы [3] и значение x по функциям $\text{tg } \varphi_2 = f(x)$ и $K = f(x)$, находим значение параметра K и фазу φ_2 .

После определения всех параметров по формулам рассчитывают значения R_1 и L_1 обмотки ПЭМП с цилиндрическим проводящим изделием [4]:

$$R_1 = R + \omega K \eta \mu_r L \sin \varphi_2; \quad (5)$$

$$L_1 = L (K \eta \mu_r \cos \varphi_2 + (1 - \eta)). \quad (6)$$

Чувствительность ПЭМП целесообразно определять к обобщённому параметру x , так как изменение электрофизических параметров, диаметра исследуемого изделия и частоты зондирующего поля приводят к изменению параметра x , а в конечном итоге к изменению активного сопротивления и индуктивности преобразователя [4].

Относительные дифференциальные чувствитель-

ности измеряемых электрических величин R и L преобразователя к обобщённому параметру x находят из соотношений:

$$S_R = \frac{\partial R_1 / \omega L_0}{\partial x} = \eta \mu_r \left(\frac{\partial K}{\partial x} \sin \varphi + \frac{\partial \sin \varphi}{\partial x} K \right), \quad (7)$$

$$S_L = \frac{\partial L_1 / L_0}{\partial x} = \eta \mu_r \left(\frac{\partial K}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial \cos \varphi}{\partial x} K \right), \quad (8)$$

где $\frac{\partial K}{\partial x}$, $\frac{\partial \sin \varphi}{\partial x}$, $\frac{\partial \cos \varphi}{\partial x}$ – производные параметров K , $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ по x , которые находят используя табличные данные, считая при этом:

$$\frac{\partial K}{\partial x} \approx \frac{\Delta K}{\Delta x}; \quad \frac{\partial \sin \varphi}{\partial x} \approx \frac{\Delta \sin \varphi}{\Delta x}; \quad \frac{\partial \cos \varphi}{\partial x} \approx \frac{\Delta \cos \varphi}{\Delta x}$$

– для конкретных значений x и K (Δx , ΔK , $\Delta \sin \varphi$ и $\Delta \cos \varphi$ – приращения параметров, соответствующие разностям их значений в окрестностях точек).

При работе ПЭМП, включённого в мостовую схему, необходимо измерять R , L и R_1 , L_1 , то есть электрическое сопротивление и индуктивность обмотки преобразователя при отсутствии и наличии в нем изделия на какой-либо фиксированной частоте. По результатам измерений R , L и R_1 , L_1 на основании формул (5) (6) и учитывая выражение:

$$|\bar{K}| = \frac{2}{x} \sqrt{\frac{\text{ber}_1^2 x + \text{bei}_1^2 x}{\text{ber}_0^2 x + \text{bei}_0^2 x}}, \quad (9)$$

где ber , bei – функции Кельвина первого и нулевого порядка [5,6].

Выражение для расчёта, нормированного магнитного потока Φ_n :

$$\Phi_{2n} = \frac{1}{L \omega} \sqrt{(\omega L_1 - \omega L (1 - \eta))^2 + (R_1 - R)^2}. \quad (10)$$

Формула для определения фазового угла φ_2 параметра Φ_n имеет следующий вид:

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{R_1 - R}{\omega L_1 - \omega L (1 - \eta)}. \quad (11)$$

Используя универсальную функцию преобразования, т.е. $\varphi_2 = f(x)$, находят обобщённый параметр x по формуле (1). Затем по универсальной функции преобразования, т.е. $K = f(x)$, определяют параметр K . После этого на основании (9) вычисляют значение μ_r для сплошного цилиндра по формуле:

$$\mu_r = \frac{1}{L \omega \eta K} \sqrt{(\omega L_1 - \omega L (1 - \eta))^2 + (R_1 - R)^2}. \quad (12)$$

А, исходя из (1), рассчитывают σ из выражения:

$$\sigma = \frac{x^2}{2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f}. \quad (13)$$

На рис. 1 изображена экспериментальная установка на базе моста переменного тока Е7-8 и параметрического датчика. В табл. 1 приведены измеренные и расчётные величины двухпараметрового контроля.

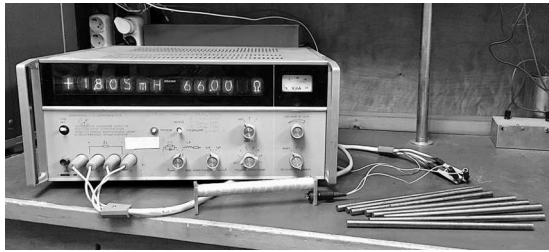


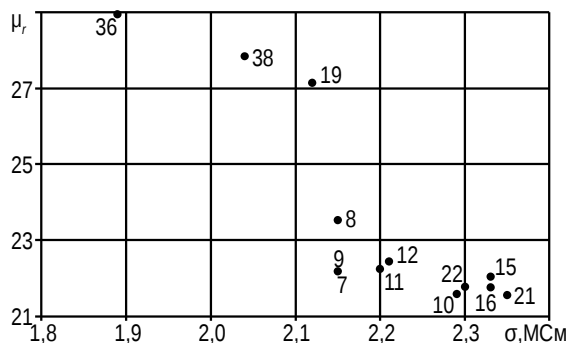
Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Табл. 1. Результаты экспериментального определения μ_r и σ

№	L_1 , мГн	R_1 , Ом	$\text{tg}\varphi_2$	x	μ_r	σ , МСм
11	8,44	100,6	0,7386	3,105	22,23	2,20
21	8,052	99,17	0,7476	3,166	21,56	2,35
10	8,168	99,47	0,7419	3,127	21,59	2,29
12	8,44	100,7	0,7423	3,132	22,45	2,21
16	8,073	98,96	0,7432	3,135	21,76	2,33
15	8,122	99,28	0,7455	3,152	22,04	2,33
9	8,53	100,7	0,7334	3,072	22,19	2,15
7	8,54	100,7	0,7326	3,066	22,19	2,15
19	9,22	105,9	0,7729	3,373	27,14	2,12
22	8,177	99,6	0,7445	3,145	21,77	2,30
8	8,61	101,2	0,7377	3,099	23,54	2,15
38	9,38	106,2	0,7629	3,283	27,84	2,04
36	9,97	108,9	0,7589	3,252	28,94	1,89

В качестве образцов применяли цилиндрические стержни разных марок стали. В эксперименте использовался автоматический мост переменного тока E7-8 и параметрический преобразователь с параметрами: $R = 66,6$ Ом; $L = 1,807$ мГн, $l_n = 0,24$ м, $2a_n = 0,0162$ м. Измерения проводились на частоте 1000 Гц. Для создания однородного поля использовался параметрический преобразователь с отношением геометрических параметров $l_n / 2a_n > 10$.

На рис. 2 приведены зависимости экспериментального определения μ_r и σ , позволяющие сортировать образцы по маркам стали. Из него следует, что образцы 9 и 7 принадлежат одной марке стали, 11 и 12 другой, а образцы 22, 10, 15, 16, 21 третьей и т.д.

Рис. 2. Зависимости экспериментального определения μ_r и σ

Очень важным метрологическим параметром является погрешность метода. Поскольку в нашем случае косвенный метод измерения, то определение погрешностей одновременного измерения μ_r и σ для случая включения ПЭМП в схему RL -моста перемен-

ного тока будет следующим.

Обозначив $\text{tg} \varphi = z$ и используя выражения $\mu_r = \frac{\Phi_n}{\eta K}$, $\sigma = \frac{N_x}{\mu_0 \omega \Phi_n a_n^2}$, а также результаты работы, получим формулы для оценки относительных погрешностей метода одновременного измерения μ_r и σ :

$$\gamma_\mu = 1,1 \sqrt{\gamma_{\Phi_n}^2 + (A_\mu \gamma_z)^2 + \gamma_\eta^2}, \quad (14)$$

$$\gamma_\sigma = 1,1 \sqrt{\gamma_{\Phi_n}^2 + (A_\sigma \gamma_z)^2 + \gamma_\omega^2 + 4 \gamma_{a_n}^2}, \quad (15)$$

где $\gamma_{\Phi_n}, \gamma_z, \gamma_\eta, \gamma_\omega, \gamma_{a_n}$ – относительные погрешности параметров, соответствующие индексам при погрешностях, (эти погрешности носят случайный характер):

$$A_\mu = f'_3(z) \cdot z / f_3(z); \quad (16)$$

$$A_\sigma = f'_5(z) \cdot z / f_5(z) \quad (17)$$

– коэффициенты влияния при погрешностях γ_z ; $f'_3(z)$ и $f'_5(z)$ – производные функций по аргументу $z = \text{tg} \varphi$.

Считая при этом: $f'_3(z) \approx \frac{\Delta K}{\Delta z}$; $f'_5(z) \approx \frac{\Delta N_x}{\Delta z}$ – для конкретных значений z (Δz , ΔK и ΔN_x – приращения параметров, соответствующие разностям их значений в окрестностях рабочей точки).

Погрешности γ_{Φ_n} и γ_z зависят от схемы включения преобразователя, реализующей метод одновременного измерения μ_r и σ . Применительно к рассматриваемой схеме получим формулы для определения относительных погрешностей γ_{Φ_n} и γ_z :

$$\gamma_{\Phi_n}^2 = (m_\omega \gamma_\omega)^2 + (m_{L_0} \gamma_{L_0})^2 + (m_{L_1} \gamma_{L_1})^2 + (m_{R_0} \gamma_{R_0})^2 + (m_{R_1} \gamma_{R_1})^2 + (m_\eta \gamma_\eta)^2; \quad (18)$$

$$\gamma_z^2 = (n_\omega \gamma_\omega)^2 + (n_{L_0} \gamma_{L_0})^2 + (n_{L_1} \gamma_{L_1})^2 + (n_{R_0} \gamma_{R_0})^2 + (n_{R_1} \gamma_{R_1})^2 + (n_\eta \gamma_\eta)^2, \quad (19)$$

где $\gamma_{R_0}, \gamma_{R_1}, \gamma_{L_0}, \gamma_{L_1}$ – относительные погрешности параметров, соответствующие индексам при погрешностях, характерные значения которых определяются в основном классами точности используемых измерительных приборов. При этом:

$$m_\omega = \frac{(R_1 - R_0)^2}{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta) L_0]^2}; \quad (20)$$

$$m_{L_0} = \frac{\omega^2 L_0 (1 - \eta) [L_0 (1 - \eta) - L_1]}{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta) L_0]^2} - 1; \quad (21)$$

$$m_{L_1} = \frac{\omega^2 L_1 [L_1 - (1 - \eta) L_0]}{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta) L_0]^2}; \quad (22)$$

$$m_{R_0} = \frac{(R_1 - R_0) R_0}{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta) L_0]^2}; \quad (23)$$

$$m_{R_1} = \frac{(R_1 - R_0)R_1}{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta)L_0]^2}; \quad (24)$$

$$m_{\eta} = \frac{\omega^2 \eta L_0 [L_1 - (1 - \eta)L_0]}{(R_1 - R_0)^2 + \omega^2 [L_1 - (1 - \eta)L_0]^2}, \quad (25)$$

– коэффициенты влияния при определении относительной погрешности модуля нормированного магнитного потока;

$$n_{\omega} = 1; n_{L_0} = \frac{L_1(1 - \eta)}{L_1 - (1 - \eta)L_0}; n_{L_1} = \frac{L_1}{L_1 - (1 - \eta)L_0}; \quad (26)$$

$$n_{R_0} = \frac{R_0}{R_1 - R_0}; n_{R_1} = \frac{R_1}{R_1 - R_0}; n_{\eta} = \frac{\eta L_0}{L_1 - (1 - \eta)L_0}, \quad (27)$$

– коэффициенты влияния при определении относительной погрешности фазы нормированного магнитного потока.

Выражения (14), (15) и (18), (19) получены в предположении, что распределение каждой исходной относительной погрешности внутри заданных границ равновероятно.

Характерные значения относительных погрешностей измерения признаков R и L мостом переменного тока принимались $\gamma_{R_0} \approx \gamma_{R_1} \approx \gamma_{L_0} \approx \gamma_{L_1} \approx 0,2\%$. Погрешность измерения частоты $\gamma_{\omega} \approx 0,1\%$. На основании расчёта поведения зависимостей относительных погрешностей γ_{μ} и γ_{σ} от обобщённого параметра x можно сделать вывод, что существует оптимальный диапазон изменения параметра ($1,5 \leq x \leq 3$), в котором погрешности одновременного измерения μ_r и σ минимальны.

Суммарные погрешности определения относительной магнитной проницаемости не превышали 1,3 %, а удельной электрической проводимости 2,6 %.

Выводы. В работе решена прямая и обратная задача при исследовании электромагнитного преобразователя для контроля электромагнитных параметров цилиндрических образцов, изготовленных из разных марок стали. Определены рациональные режимы работы преобразователя по чувствительности метода для обобщённого параметра x ($1,5 \leq x \leq 3$). Оценены погрешности бесконтактного контроля магнитных и электрических параметров, которые составили 1,3 % и 2,6 % соответственно.

Список литературы

1. Ключев В. В., Шкатов П. Н. *Комбинированные методы вихретокового, магнитного и электропотенциального контроля*. Москва: Издательский дом «Спектр», 2011. 191 с.
2. *Неразрушающий контроль: справочник*. В 8 т. Т. 6. В 3 кн. Кн. 1: *Магнитные методы контроля* / В. В. Ключев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Москва: Машиностроение, 2004. 832 с.
3. Горкунов Б. М., Себко В. П., Тодоров Е. И. Вихретоковый параметрический преобразователь с улучшенными характеристиками. *Дефектоскопия*. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34027014>. (дата обращения 15.04.2019).
4. Горкунов Б. М., Авраменко А. А., Львов С. Г. и др. Оптимизация работы электромагнитного преобразователя по частоте возбуждающего поля. *Энергосбережение. Энергетика. Энергаудит*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014, №9 (128), Т.2. С. 120–124.
5. Двайт Г.Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. URL: http://old.pskgu.ru/ebooks/gb_dwait.html. (дата обращения 05.04.2019).
6. Абрмовиц М. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*. URL: https://fileskachat.com/file/10747_8a03f6da39943dd57040d2d4b1746c8f.html. (дата обращения 20.04.2019).

References (transliterated)

1. Kljuev V. V., Shkatov P. N. *Kombinirovannyye metody vihetokovogo, magnitnogo i jelektropotencial'nogo kontrolya* [Combined eddy current, magnetic, and electropotential control methods]. Moscow: Spektr Publ., 2011. 191 p.
2. *Nerazrushayushchij kontrol': spravochnik* [Non-Destructive Testing]. V 8 t. T. 6. V 3 kn. Kn. 1: *Magnitnye metody kontrolya* [Magnetic control methods] / V. V. Klyuev, V. F. Muzhichij, E. S. Gorkunov, V. E. SHCHerbinin. Moskva: Mashinostroenie, 2004. 832 p.
3. Gorkunov B.M., Sebkov V.P., Todorov E.I. *Vihretokovyy parametricheskij preobrazovatel' s uluchshennymi harakteristikami* [Eddy current parametric converter with improved characteristics]. *Defektoskopiya* [Flaw detection]. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34027014>. (accessed 15.04.2019).
4. Gorkunov B. M., Avramenko A. A., L'vov S. G. Optimizatsiya raboty jelektromagnitnogo preobrazovatelya po chastote vzbuzhdajushhego polja [Optimization of the electromagnetic transducer operation according to the frequency of the exciting field]. *Jenergosberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit* [Energy saving. Power engineering. Energy audit]. Kharkov: NTU «KhPI». 2014, № 9 (128), vol. 2. pp. 120–124.
5. Dwight G.B. *Tablitsyi integralov i drugie matematicheskie formuly* [Tables of integrals and other mathematical formulas]. URL: http://old.pskgu.ru/ebooks/gb_dwait.html. (accessed 05.04.2019).
6. Abromovits M., Stigan M. *Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook for special functions with formulas, graphs and math tables]. URL: https://fileskachat.com/file/10747_8a03f6da39943dd57040d2d4b1746c8f.html. (accessed 20.04.2019).

Поступила 11.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Горкунов Борис Митрофанович (Горкунов Борис Митрофанович, Gorkunov Boris Mitrofanovich) – доктор технічних наук, професор; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»; м. Харків, Україна; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Львов Сергій Геннадійович (Львов Сергей Геннадиевич, Lvov Sergij Gennadijovych) – кандидат технічних наук, доцент; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»; м. Харків, Україна; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua

Гладченко Дар'я Віталіївна (Гладченко Дарья Виталиевна, Hladchenko Daria Vitalievna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»; м. Харків, Україна; e-mail: elglafira@gmail.com

Саліба Абдель Нур (Саліба Абдель Нур, Saliba Abdel Nour) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»; м. Харків, Україна; e-mail: abdel.nour.saliba@gmail.com